

LES MATÉRIAUX SUPRACONDUCTEURS

- Niveau(x) : Spécialité terminale S
- Type d'activités : Synthèse argumentée à partir d'un ensemble de documents
- Support : Documents
- Durée estimée : 2 h
- Pré-requis : Champ magnétique : sources de champ magnétique (Terre, aimant, courant). (1ere S)
- Compétences exigibles (BO) : aucune
- Compétences travaillées : Extraire et exploiter ,
Réaliser une synthèse argumentée.

Résumé : Synthèse argumentée sur le thème des matériaux (mot clé supraconducteur)

« Quelles sont les applications possibles des matériaux supraconducteurs et quels défis doivent être relevés par les chercheurs ? »

Consigne : À l'aide des documents et en utilisant vos connaissances, vous rédigerez, en trente lignes maximum, une synthèse argumentée répondant à la problématique ci-dessus.

Pour cela, vous présenterez le phénomène de supraconductivité. Vous indiquerez des applications possibles des matériaux supraconducteurs et justifierez leur intérêt en faisant appel entre autres au document 4. Vous terminerez en indiquant le principal problème auquel sont confrontés les chercheurs et vous expliquerez les pistes envisagées depuis plus de 100 ans pour le résoudre.

Échelle Kelvin : Dans les documents, les températures sont exprimées en Kelvin. La plus basse température avec cette échelle est 0 K (le zéro absolu). Pour passer de la température θ en $^{\circ}\text{C}$ à la température T en K, on utilise la formule suivante : **$\theta = T + 273,15$**

Températures d'ébullition à 1013 hPa : $T_{\text{eb}}(\text{He}) = 4,2 \text{ K}$; $T_{\text{eb}}(\text{H}_2) = 20,2 \text{ K}$; $T_{\text{eb}}(\text{N}_2) = 77,4 \text{ K}$

Document 1 : « Découverte de la supraconductivité par H K Onnes en 1911 »

Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden; No. 120b, par Onnes, 1911. (Nobel 1913 pour « ses travaux sur les propriétés de la matière aux basses températures, qui conduisirent, entre autres, à la production d'hélium liquide »)

§ 3. *The resistance of pure mercury.* The third most important determination was one of the resistance of mercury. [...] From this it was concluded:

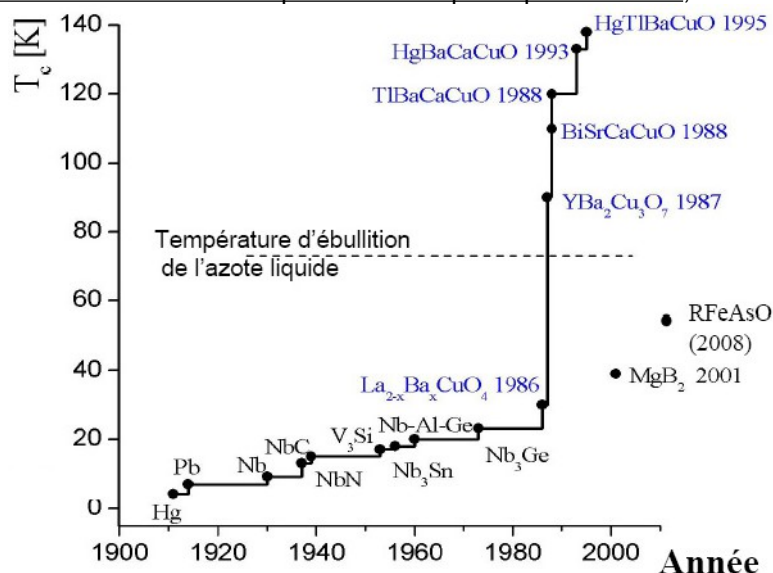
1. That the resistance of pure mercury would be found to be much smaller at the boiling point of helium than at hydrogen temperatures, although its accurate quantitative determination would still be obtainable by experiment; 2. that the resistance at that stage would not yet be independent of the temperature, and 3. that at very low temperatures such as could be obtained by helium evaporating under reduced pressure the resistance would, within the limits of experimental accuracy, become zero.

Experiment has completely confirmed this forecast. While the resistance at 13° 9 K is still 0.034 times the resistance of solid mercury extrapolated to 0°C. at 4° 3 K, it is only 0.0013, while at 3° K it falls to less than 0.0001.

The fact, experimentally established, that a pure metal can be brought to such a condition that its electrical resistance becomes zero, or at least differs inappreciably from that value, is certainly of itself of the highest importance.

Document 2 : « Température critique T_c des supraconducteurs et année de découverte »

Illustration d'après *De l'atome au matériau. Les phénomènes quantiques collectifs*, Antoine George



Document 3 : « Récit de leur découverte par deux prix Nobel »

www.larecherche.fr [lien : <http://goo.gl/SRC7m>], par Alex Müller et J. Georg Bednorz (prix Nobel 1987 pour « leur percée importante dans la découverte de la supraconductivité de matériaux céramiques. »)

C'est en janvier 1986 que le premier indice tangible d'une possible supraconductivité à haute température a été découvert au laboratoire de recherche IBM de Zurich, installé dans le petit village de Rüslikon. En refroidissant un échantillon d'oxyde de cuivre, de baryum et de lanthane, J. G. Bednorz a constaté que la résistivité électrique de cet échantillon commençait à décroître rapidement à une température de l'ordre d'une vingtaine de kelvins. Puis, en changeant la concentration de baryum, on a pu observer ce début de décroissance à une trentaine de kelvins. Trente kelvins, cela correspond à moins deux cent quarante-trois degrés Celsius : c'est donc encore une température relativement basse. Mais dans le domaine des supraconducteurs, cela représentait un progrès considérable que la plupart des physiciens n'attendaient plus. [...]

Notre première réaction a été de vérifier que nous n'avions pas commis d'erreur de mesure. [...] Pour être bien sûr du résultat obtenu, nous avons donc reproduit plusieurs fois les expériences en utilisant différentes méthodes de mesures de la température. Finalement, c'est en avril 1986 qu'un premier article intitulé «Possible High Tc Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System» a été publié dans la revue allemande Zeitschrift für Physik.

A l'époque, nous n'étions que deux à travailler sur le sujet. Puis pendant l'été 1986, M. Takashige, professeur assistant à l'université de Tokyo, en visite au laboratoire de Rüslikon, est venu se joindre à nous. Après les mesures de résistivité électrique, c'est donc à trois que nous avons continué les recherches, par des mesures de susceptibilité magnétique. En septembre, le deuxième indice sérieux de l'existence de la supraconductivité à haute température a pu être obtenu [...]

Cette fois, l'affaire était devenue très sérieuse. Le 10 octobre 1986, une deuxième publication intitulée "Susceptibility Measurements Support High Tc Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System" était soumise à la revue Europhysics Letters.

Parallèlement, les premières confirmations sont venues du Japon, où le professeur S. Tanaka et son équipe ont été les premiers à corroborer les résultats obtenus à Rüslikon. La nouvelle a été annoncée dans le grand quotidien japonais Asahi Shinbun. Puis, fin décembre 1986, en remplaçant le baryum par du strontium dans les composés, deux équipes ont réussi à augmenter les températures de transition jusque vers quarante kelvins : celle du professeur Tanaka à Tokyo et un groupe des laboratoires ATT Bell, aux Etats-Unis. De son côté, C. W. Chu et ses collaborateurs obtenaient également d'intéressants résultats à l'université de Houston, au Texas. En mettant sous pression les premiers composés au baryum, ils arrivaient aussi à des températures de transition de l'ordre de cinquante kelvins. Dès cette époque, Chu avait la conviction intime de pouvoir dépasser le "mur" des soixante-dix-sept kelvins température de l'azote liquide. La suite des événements a montré que son optimisme était bien justifié. [...] Pour les applications, c'est déjà un avantage considérable puisqu'on peut alors se contenter d'un refroidissement par circulation d'azote liquide. [...] A l'heure actuelle, des budgets considérables ont été affectés aux recherches sur les supraconducteurs à haute température, principalement au Japon et aux Etats-Unis, et, plusieurs milliers de physiciens à travers le monde étudient tous les aspects scientifiques et techniques de ces matériaux.

Document 4 : « Un peu de physique »

Énergie thermique E en joule perdue dans un conducteur (« effet Joule ») en fonction de l'intensité I et de la résistance du conducteur R : $E = R \times I^2$

Une bobine (un enroulement de fil conducteur) parcourue par un courant crée un champ magnétique. Le champ magnétique se mesure en Tesla de symbole T. Un champ magnétique de 1 T est déjà très intense et correspond à la limite des aimants permanents. Pour obtenir des champs plus intenses, il faut ensuite utiliser des bobines.

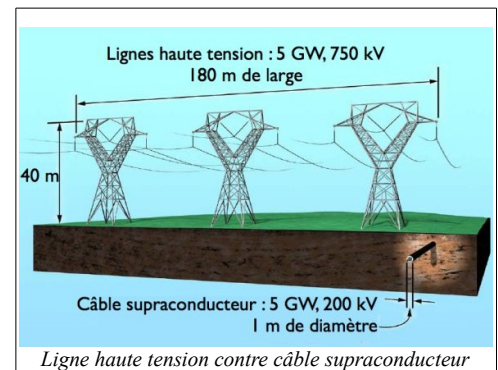
Champ magnétique B en Tesla au centre d'une bobine de rayon R, contenant N spires (tours de fil) et traversée par un courant d'intensité I avec $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$: $B = N \frac{\mu_0 I}{2R}$

Document 5 : « Les supraconducteurs : leur rôle aujourd'hui et pourquoi les étudier. »

<http://www.toulouse.lncmi.cnrs.fr/spip.php?rubrique148>

Les supraconducteurs sont l'équivalent électronique des lasers. Dans les deux cas la cohérence quantique est à l'origine du phénomène. Pour le cas du laser, les photons issus de l'émission stimulée sont tous "synchronisés", conférant ainsi au faisceau laser une puissance, un focus, et un spectre inégalable par l'ampoule électrique. [...] Dans un supraconducteur, la cohérence quantique s'effectue au niveau électronique : ce sont les électrons, appareillés en paires dites de Cooper, qui forment cette fois-ci un état cohérent. De cette cohérence électronique émerge deux phénomènes spectaculaires. Le premier est celui qui donne son nom à ces matériaux : la supraconductivité, le transport électrique sans perte, ou, pour le cas d'une boucle de courant, le mouvement perpétuel. [...] La seconde propriété, encore plus spectaculaire, est l'effet Meissner. Lorsque plongé dans un champ magnétique, un supraconducteur devient un matériau diamagnétique parfait, expulsant les lignes de champs magnétiques en son sein, permettant le phénomène de lévitation [...].

Les supraconducteurs peuvent aussi apporter des solutions techniques nouvelles à des problèmes modernes de plus en plus alarmant. Avec la densification urbaine, l'augmentation des besoins en énergie, et la nécessité de transporter cette énergie, de plus en plus issue de zones hostiles, loins des grands centres urbains, où règnent vents, marées et radiations solaires intenses, les supraconducteurs permettent de transporter l'énergie électrique avec des pertes négligeables, sur de grandes distances, et de manière beaucoup plus compacte (voir figure ci-contre). Plusieurs entreprises tels que American



Ligne haute tension contre câble supraconducteur

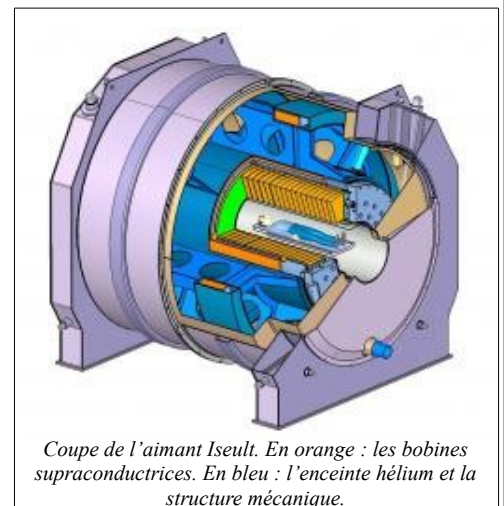
Superconductor aux États-Unis ou Nexans en Europe se sont lancées dans la conception et la production de câbles supraconducteurs dont certains ont déjà intégrés le réseau de distribution électrique dans un projet de démonstration à Long Island, NY. La faisabilité d'une telle technologie est donc démontrée. Cependant, l'inconvénient de la supraconductivité est qu'elle n'apparaît qu'à basse température. Les câbles de Long Island sont ainsi refroidis à la température d'ébullition de l'azote soit $T = 77 \text{ K}$ (-196°C). La supraconductivité est en effet un phénomène apparaissant sous une température critique T_c .

Document 6 : « IRM : le projet Iseult pour la plateforme Neurospin »

http://irfu.cea.fr/Sacm/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast_visu.php?id_ast=2909

L'aimant Iseult de 11,75 T* corps entier qui doit être installé à Neurospin en 2013 est la pièce maîtresse d'un système d'imagerie par résonance magnétique (IRM) qui repoussera les limites de l'imagerie cérébrale. [...]

L'aimant Iseult comporte un certain nombre de caractéristiques qui le distinguent des aimants d'IRM conventionnels. Le bobinage principal de l'aimant, pesant 45 tonnes, doit être positionné le plus précisément possible autour du cerveau (à quelques dixièmes de millimètres). Le bobinage est réalisé à partir de plusieurs milliers de kilomètres de fils supraconducteurs en niobium titane bobinés en doubles galettes et parcourus par un courant de 1400 A stable à 0,05 ppm/h. Ce supraconducteur est maintenu à très basse température (1,8 K au dessus du zéro absolu) à l'aide de plusieurs milliers de litres d'hélium superfluide protégés de la température extérieure par une série d'enceintes, telle une gigantesque bouteille thermos.

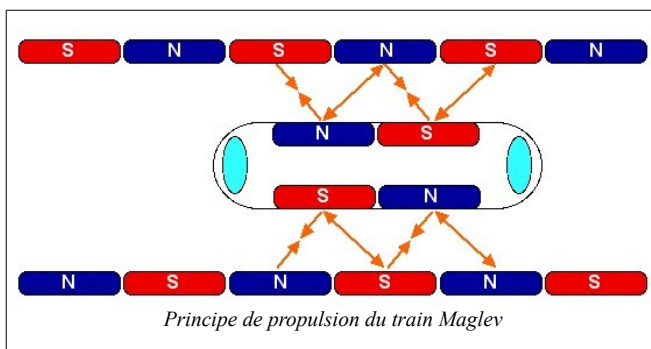


* Voir document 4

Document 7 : « Trains Maglev: un aimant supraconducteur sans système de refroidissement »

<http://www.techno-science.net/?onglet=news&news=8027>

Le train à sustentation magnétique japonais fonctionne avec un moteur linéaire synchrone. Le train dispose de bobines magnétiques positionnées le long de la rame avec les pôles Nord et Sud disposés alternativement de l'avant vers l'arrière du train. Des bobines de propulsion sont situées tout le long de la voie. Elles sont alimentées en courant alternatif dont la fréquence est asservie à la vitesse du train. Ainsi chaque bobine voit ses pôles



s'inverser de manière à ce qu'elle repousse la bobine du train qui vient de passer devant elle et attire celle qui vient vers elle. Toutes les forces exercées sur le train concourent ainsi à le propulser dans le même sens. Le déplacement du train induit alors un courant électrique dans les bobines de sustentation situées au sol. Quand le champ magnétique de ces dernières devient suffisamment important, c'est-à-dire quand le train dépasse les 100 à 150 km/h, celui-ci lève de 10 cm du fait de l'interaction entre les bobines situées à bord du train et au sol.

Le nouvel aimant développé par le RTRI possède des bobines en yttrium. Leur supraconductivité est maintenue même à la température "élevée" de 50 K. Le champ magnétique au coeur de la bobine est de 2 T* à 30 K et de 1 T* à 50 K [...]. Par ailleurs, les bobines sont enfermées sous vide dans une coque qui maintient une température inférieure à 50 K pendant 9 heures (avec une température de départ de 20 K). Cette caractéristique pourrait permettre à l'avenir de ne pas embarquer à bord du train les systèmes de refroidissement des aimants, la durée de préservation de la température étant bien supérieure à celle du parcours prévue entre Tokyo et Osaka (une heure).

* Voir document 4

Traduction du document 1 pour ceux qui ont des difficultés.

§ 3. *La résistance du mercure pur.* La troisième mesure la plus importante est la résistance du mercure pur. [...] À partir de ceci, il a été conclu :

1. que la résistance du mercure pur serait trouvée plus petite à la température du point d'ébullition de d'hélium qu'à celle de l'hydrogène, bien sa mesure précise soit inatteignable expérimentalement ; 2. que la résistance à cette étape ne serait plus indépendante de la température, et 3. qu'à de très basses températures, telles que celle obtenues par de l'hélium s'évaporant sous pression réduite, la résistance deviendrait, dans les limites de la précision de l'expérience, nulle.

L'expérience a entièrement confirmé cette prédiction. Alors que la résistance à 13,9 K est encore 0,034 fois la résistance du mercure solide extrapolée à 0°C, à 4,3 K, ce n'est plus que 0,0013 fois et à 3 K, elle chute à moins de 0,0001 fois.

Le fait, établi expérimentalement, est qu'un métal pur peut être amené dans un certain état où sa résistance électrique devient nulle, ou du moins ne diffère que de très peu de cette valeur, est certainement en soi de la plus haute importance.